

复合材料的焊接

于启湛 史春元 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

复合材料的焊接

于启湛 史春元 编



机械工业出版社

本书对不同基体（包括金属、陶瓷、碳和有机材料等非金属）、不同形态（纤维、颗粒、晶须）和不同增强材料的复合材料的种类、性能、焊接性、焊接材料的选用、焊接工艺及焊接质量保障，进行了比较详细的讨论。

本书可供高等院校焊接、材料专业的师生以及科研机构、新产品制造和维修的技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

复合材料的焊接/于启湛，史春元编. —北京：机械工业出版社，2011. 12
ISBN 978 - 7 - 111 - 36236 - 4

I. ①复… II. ①于…②史… III. ①复合材料 - 焊接工艺 IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 215798 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：吕德齐 责任编辑：吕德齐 王彦青

版式设计：张世琴 责任校对：张莉娟

封面设计：姚 毅 责任印制：杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2012 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 12 印张 · 292 千字

0 001 — 4 000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 36236 - 4

定价：35.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

策划编辑：(010)88379772

社服务中心：(010)88361066

网络服务

销 售 一 部：(010)68326294

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部：(010)88379649

教材网：<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着科学技术特别是高新技术的发展，各行业的生产需要对材料提出了更高的要求。传统的金属及其合金已无法满足这些要求，因此人们开发了一种新型的材料——复合材料：将已有的金属和非金属材料以不同的工艺方法复合在一起，以满足一种材料无法满足的使用性能的要求。

复合材料可以根据预期的性能指标将不同的材料（包括金属和非金属）通过复合工艺按一定的设计要求复合在一起，以充分发挥其优点。这种复合材料具有任何单一材料所难以达到的优越性能，比如，高的比强度和比模量，耐高温，耐低温，耐热冲击，线胀系数小，尺寸稳定性好，耐磨和耐腐蚀等。这种材料在航空、航天等高新技术领域发挥了重要的作用，并在建筑、交通运输、化工、机械等方面也得到了广泛应用。这些材料包括金属基和非金属基（有机、无机）复合材料等。在复合材料中，一相为连续相，作为基体相，可以是金属或非金属；另一相为分散相，它可以大大改善基体相的性能。

复合材料具有很复杂的性能，一般来说，其焊接性不佳，需要采用特殊的焊接工艺才能得到满意的焊接接头。另外，这些材料应用于工作条件比较恶劣的环境下，它是开发应用时间较短，但发展很快的新型材料，因此将国内外关于这类材料焊接应用的研究成果汇集成册，以供从事这类材料焊接应用的研究人员、生产和维修技术人员以及高等院校师生参考使用，是很有必要的。

本书对不同基体（包括金属、陶瓷、碳和有机材料等非金属）、不同形态（纤维、颗粒、晶须）和不同增强材料的复合材料的种类、性能、焊接性、焊接材料的选用、焊接工艺及焊接质量保障，进行了比较详细的讨论。

由于编者水平有限，加上科学技术发展迅速，以及有关新技术、新材料不断涌现，因此，书中难免有谬误之处，敬请广大读者指正、谅解。若本书对您有所裨益，本人不胜荣幸。本书在编写过程中参考了大量的文献，在此特对本书引用资料的国内外作者表示敬意和感谢！

大连交通大学 于启湛

目 录

前言

第 1 章 金属基复合材料的焊接	1
1.1 概述	1
1.1.1 复合材料的分类	1
1.1.2 复合材料的特点	2
1.2 金属基复合材料的性能及焊接特点	3
1.2.1 连续纤维增强金属基复合材料的焊接特点	4
1.2.2 非连续纤维增强金属基复合材料的性能及焊接特点	11
1.3 连续纤维增强金属基复合材料的焊接	23
1.3.1 电弧焊	24
1.3.2 激光焊	25
1.3.3 扩散焊	26
1.3.4 钎焊	28
1.3.5 电阻焊	36
1.3.6 胶接	38
1.4 非连续 SiC 纤维增强金属基复合材料的焊接	41
1.4.1 非连续 SiC 纤维增强铝基复合材料的焊接性	41
1.4.2 SiC 增强铝基复合材料的惰性气体保护焊	44
1.4.3 SiC 增强铝基复合材料的激光焊	47
1.4.4 SiC 增强铝基复合材料电子束焊	52
1.4.5 SiC 增强铝基复合材料等离子弧焊和喷涂	57
1.4.6 SiC 增强铝基复合材料半固态焊	71
1.4.7 SiC 增强铝基复合材料摩擦焊	72
1.4.8 SiC 增强铝基复合材料闪光对焊	74
1.4.9 SiC 增强铝基复合材料钎焊	74
1.4.10 SiC 增强铝基复合材料粉末中间层的反应扩散焊	78
1.4.11 SiC 增强铝基复合材料无中间层的液相扩散焊	80
1.5 Al ₂ O ₃ 增强铝基复合材料的焊接	81
1.5.1 Al ₂ O ₃ 增强铝基复合材料扩散焊	81
1.5.2 Al ₂ O ₃ 增强铝基复合材料瞬间液相扩散焊	82

1.5.3 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料电容储能点焊	89
1.5.4 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料常规摩擦焊	90
1.6 铁基复合材料的焊接	90
1.7 非连续增强镁基复合材料的焊接	92
1.7.1 非连续增强镁基复合材料	92
1.7.2 SiC_p/Mg 复合材料的激光焊	93
1.8 颗粒增强耐热超合金基复合材料的焊接	95
1.8.1 概述	95
1.8.2 颗粒增强复合材料制备及成形	95
1.8.3 物理性能	95
1.8.4 力学性能	96
1.8.5 颗粒增强镍基耐热复合材料的焊接	97
1.9 钛基复合材料的快速红外焊接法	100
参考文献	100
第2章 碳/碳复合材料的焊接	105
2.1 碳/碳复合材料的分类、性能及应用	105
2.1.1 碳/碳复合材料的分类	105
2.1.2 碳/碳复合材料的性能及应用	105
2.2 碳/碳复合材料的扩散焊	106
2.2.1 焊件之间生成石墨来焊接碳/碳复合材料	106
2.2.2 焊件之间生成碳化物来焊接碳/碳复合材料	108
2.2.3 用玻璃作为中间层来焊接碳/碳复合材料	111
2.2.4 采用酚醛树脂焊接碳/碳复合材料	111
2.3 碳/碳复合材料与其他材料的异种材料扩散焊	114
2.3.1 碳/碳复合材料与镍基高温合金的扩散焊	114
2.3.2 碳/碳复合材料与铌的瞬时液相扩散焊	116
2.3.3 碳/碳复合材料与 LAS 玻璃陶瓷的扩散焊接	116
2.4 碳/碳复合材料的钎焊	118
2.4.1 碳/碳复合材料之间的钎焊	118
2.4.2 碳/碳复合材料与铜的钎焊	125
2.4.3 碳/碳复合材料与钛的钎焊	128
2.5 碳/碳复合材料的胶接	131
2.5.1 碳/碳复合材料之间的胶接	131
2.5.2 碳/碳复合材料与铜的胶接	131
2.5.3 碳/碳复合材料与铝的胶接	132
2.5.4 碳/碳复合材料与钛的胶接	132
2.6 碳/碳复合材料与金属的热压焊	132
参考文献	132

第 3 章 陶瓷基复合材料的焊接	134
3.1 陶瓷基复合材料的分类、性能及应用	134
3.1.1 陶瓷基复合材料的分类	134
3.1.2 陶瓷基复合材料的性能及应用	135
3.2 陶瓷基复合材料的焊接性	137
3.2.1 陶瓷基复合材料焊接的难点和改善	137
3.2.2 陶瓷基复合材料自身的焊接性	138
3.2.3 陶瓷基复合材料与金属的焊接性	138
3.3 陶瓷基复合材料的焊接	139
3.3.1 陶瓷基复合材料的钎焊	142
3.3.2 陶瓷基复合材料的扩散焊	147
3.3.3 陶瓷基复合材料的电子束焊	150
3.3.4 陶瓷基复合材料的胶接	151
3.3.5 陶瓷基复合材料的其他焊接方法	153
3.4 C_f/SiC 增强陶瓷基复合材料的焊接	153
3.4.1 C_f/SiC 增强陶瓷基复合材料的钎焊	153
3.4.2 碳/碳化硅复合材料的液相渗透焊接	156
3.4.3 碳/碳化硅复合材料与金属的焊接	159
3.5 石英纤维复合材料的焊接	162
3.5.1 化学镀镍 QFSC 表面改性石英纤维复合材料与因瓦 (Invar) 合金的真空钎焊	162
3.5.2 石英纤维增强氧化硅基复合材料与因瓦 (Invar) 合金的胶接辅助真空钎焊	164
参考文献	166
第 4 章 树脂基复合材料的焊接	168
4.1 树脂基复合材料的分类	168
4.2 树脂基复合材料的性能及应用	169
4.3 树脂基复合材料的焊接性	172
4.4 树脂基复合材料的焊接工艺	172
4.4.1 焊接方法	172
4.4.2 树脂基复合材料与金属之间的焊接	174
4.4.3 树脂基复合材料之间的胶接	175
参考文献	183

第 1 章 金属基复合材料的焊接

1.1 概述

复合材料是根据预期的性能指标，将不同的材料（包括金属和非金属）按一定的设计要求通过复合工艺复合在一起，以充分发挥各组分的优点，从而能够满足不同的要求。复合材料具有任何单一材料所难以达到的优越性能，比如，高的比强度和比模量、耐高温、耐低温、耐热冲击、线胀系数小、尺寸稳定性好、耐磨和耐腐蚀等。复合材料在航空、航天等高新技术领域发挥了重要的作用，并在建筑、交通运输、化工、机械等方面得到了广泛应用。这些材料包括金属基和非金属基（有机、无机）复合材料等。在复合材料中，一相为连续相，它是基体相，可以是金属或非金属；另一相为分散相，它可以大大改善材料的性能。

1.1.1 复合材料的分类

复合材料的分类方法很多，可以根据基体、增强相、用途等进行分类，见表 1-1。

表 1-1 复合材料的分类

分类方法	分类名称	说 明
按基体分	聚合物基复合材料	主要有树脂基和橡胶基等
	金属基复合材料	主要有铝基、镁基、钛基等
	无机非金属基复合材料	主要有陶瓷基、混凝土基及碳/碳复合材料
按增强相形状分	连续纤维增强复合材料	纤维按照同一方向排列,复合材料具有各向异性,主要有纤维增强树脂、纤维增强金属等几类
	非连接增强复合材料	主要有短纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料和晶须增强复合材料
	层合复合材料	主要为复合钢
	纤维织物、编织体增强复合材料	主要是碳纤维织物、编织体增强碳基复合材料
按应用情况分	工程复合材料	通常指在工程上已广泛应用的复合材料,例如玻璃纤维增强塑料(又名玻璃钢)
	先进复合材料	有碳、硼、芳纶等纤维增强的塑料,金属基复合材料等,它们是比强度、比模量较大的复合材料
	混杂复合材料	由两种或两种以上的纤维混合或不同纤维的铺层混构成的复合材料

(续)

分类方法	分类名称	说 明
按增强相的材质分	无机非金属增强复合材料	主要有 C 纤维、B 纤维、SiC 纤维及颗粒、Al ₂ O ₃ 纤维及颗粒、BC ₄ 颗粒等增强的复合材料
	金属丝增强复合材料	主要有钨丝或不锈钢丝增强的铝基复合材料、钢丝增强的树脂基复合材料等
	有机纤维增强复合材料	主要有芳纶纤维增强树脂基复合材料和尼龙丝纤维增强树脂基复合材料
按用途分	结构复合材料	利用力学性能的复合材料,例如各种纤维增强树脂基复合材料、碳纤维增强铝基复合材料。如碳纤维/环氧复合材料,玻璃纤维/酚醛复合材料等
	功能复合材料	利用其力学性能以外的所有其他性能的复合材料,如碳/碳耐热复合材料、雷达用玻璃钢天线罩就是具有良好透过电磁波的功能复合材料,导电塑料、光导纤维等也是功能复合材料

1.1.2 复合材料的特点

- 1) 比强度、比刚度高,均高于金属,用其作结构件时重量轻,因此对于航空、航天及运输工具是很重要的。
- 2) 线胀系数小、尺寸稳定性好。
- 3) 耐疲劳性和断裂韧度好。
- 4) 破坏时,不会发生突然的脆性断裂,因此结构的安全性好。
- 5) 高温性能好。比如铝合金在 300℃ 时,其强度就下降到 100MPa;而石墨纤维增强铝基复合材料在 500℃ 时,其强度仍可达到 600MPa。
- 6) 耐磨性好。比如碳化硅颗粒增强铝基复合材料的耐磨性比基体铝高出数倍,甚至比铸铁还好。
- 7) 减振性好。由于复合材料的振动阻尼高,因此减振性好。
- 表 1-2 给出了一些复合材料与金属性能的比较。

表 1-2 复合材料与金属性能的比较

复 合 材 料	材 料	密度/ (g/cm ³)	弹性模量 /GPa	强度 /MPa	比模量/ [GPa/(g/cm ³)]	比强度/ [MPa/(g/cm ³)]
	40% CF/尼龙 66	1.34	22	246	16	184
	连续 S-玻璃纤维/环氧树脂	1.99	60	1750	30.2	879
	25% SiC _w /氧化铝陶瓷	3.7	390	900 抗弯强度	105	—
	50% Al ₂ O _{3f} /Al 合金	2.9	130	900 抗弯强度	49	310
	20% SiC _w /6061 Al	2.8	121	586	43	209
	20% Al ₂ O _{3p} /6061 Al	2.9	97	372	33	128
	35% SiC _f /TC4 钛合金	4.1	213	1724	52	420

(续)

金属	材 料	密度/ (g/cm ³)	弹性模量 /GPa	强度 /MPa	比模量/ [GPa/(g/cm ³)]	比强度/ [MPa/(g/cm ³)]
	Q235	7.86	210	460	27	59
	30CrMnSi 调质	7.75	196	1100	25	142
	1050、1060、1070 铝合金	2.7	69	100	26	37
	6061 铝合金	2.71	69	310	25	114
	α 钛合金	4.42	123	850	28	195
	1Cr18Ni9Ti	7.75	184	539	23	68
	TC4(Ti-6Al-4V)	4.43	114	1172	26	265

注：表中所列铝合金为 T6 处理，所列纤维增强复合材料力学性能为纤维纵向力学性能。

1.2 金属基复合材料的性能及焊接特点

金属基复合材料的基体主要是铝、镁、钛等轻质合金。因为镁合金的力学性能及耐腐蚀性不如铝；钛虽然具有较高的比强度和比刚度，但价格较高。所以应用最多的还是铝基复合材料，其次是钛基复合材料，而镁基复合材料较少应用。金属基复合材料的焊接比金属本身的焊接要困难得多，主要有如下问题：

- 1) 金属基体与增强相之间会发生反应。
- 2) 熔池的粘度大，液态金属的流动性差，焊缝成形困难。
- 3) 熔化焊时，易破坏增强相。

表 1-3 给出了各种常见焊接方法在金属基复合材料焊接中的适用范围。表 1-4 给出了常见金属基复合材料的焊接方法。

表 1-3 各种常见焊接方法在金属基复合材料焊接中的适用范围

焊接方法	焊接工艺	焊接参数	接头强度系数	局限性	应用范围
电弧焊	TIG、MIG	$T_W > T_M$ $t_W = 0.5 \sim 5s$ $p_W = 0 \sim 1MPa$	0.60 ~ 0.75	易损伤纤维，接头强度较低	主要焊接颗粒增强和晶须增强金属基复合材料，可焊接各种结构
电阻焊	点焊、缝焊	$T_W > T_M$ $t_W = 0.33 \sim 0.8s$ $p_W = 200 \sim 800MPa$	0.9 ~ 0.95	金属基体易挤出，易损伤纤维，增强颗粒易偏聚	板件的拼缝、杆件及承力壳体的密封焊接
扩散焊	真空扩散焊、惰性气体保护扩散焊	$T_W < T_M$ $t_W = 600 \sim 2400s$ $p_W = 5 \sim 10MPa$	0.9 ~ 0.95	工艺复杂，时间长，效率低，尺寸受限	坯件的承载焊缝及包层，各种小尺寸的简单构件焊接
激光焊	CO ₂ 激光焊、YAG 脉冲激光焊	$T_W > T_M$ $t_W = 0.2 \sim 2s$ $p_W = 0 \sim 1MPa$	最大可达 0.85	增强物极易溶解，极易引起界面反应	板材、棒材的焊接，承力壳体的焊接

(续)

焊接方法	焊接工艺	焊接参数	接头强度系数	局限性	应用范围
电子束焊	真空	$T_W > T_M$ $t_W = 0.2 \sim 2s$ $p_W = 0 \sim 1MPa$	0.8 ~ 0.85	增强物易溶解,易引起界面反应	板材、棒材的焊接,承力壳体的焊接
钎焊	电阻钎焊、压力钎焊	$T_W < T_M$ $t_W = 0.5 \sim 5s$ $p_W = 1 \sim 100MPa$	0.5 ~ 0.6	接头耐蚀性差	板件及加强筋的连接,坯件的包层
旋转摩擦焊接	—	$T_W \leq T_M$ $t_W = 0.5 \sim 5s$ $p_W = 0.5 \sim 1MPa$	0.9 ~ 1	不能焊接纤维增强复合材料	板状构件的焊接
搅拌摩擦焊	—	$T_W \leq T_M$ $t_W = 0.5 \sim 5s$ $p_W = 0.5 \sim 1MPa$	0.9 ~ 1	设备复杂,成本高	各种构件的焊接
胶接	—	$T_W \ll T_M$ $t_W = 0.1 \sim 50h$ $p_W = 1 \sim 10MPa$	0.4 ~ 0.6	接头强度低,使用温度低	各种构件的焊接

注： T_W 、 p_W 、 t_W 分别为焊接峰值温度、压力及时间， T_M 为基体的熔点。

表 1-4 适用于各种常见金属基复合材料的焊接方法

焊接方法	电弧焊钎焊				激光焊	电子束焊	电容储能焊	电阻焊	旋转摩擦焊	搅拌摩擦焊	钎焊	扩散焊	胶接	超声波焊
	TIG	MIG	CO ₂	SAW										
TiC _p /Fe	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓
SiC _f /Ti	○	○	×	×	×	○	×	✓	○	○	✓	✓	✓	✓
B _f /Al	○	○	×	×	×	○	×	✓	○	○	✓	✓	✓	✓
SiC _f /Al	○	○	×	×	×	○	✓	✓	○	○	✓	✓	✓	✓
SiC _w /Al	○	○	×	×	○	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SiC _p /Al	○	○	×	×	○	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Al ₂ O _{3f} /Al	○	○	×	×	×	○	✓	✓	○	○	✓	✓	✓	✓
Al ₂ O _{3p} /Al	✓	✓	×	×	○	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
层合钢板	✓	✓	✓	✓	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○

注：✓——推荐方法；○——可选方法；×——不能使用。

1.2.1 连续纤维增强金属基复合材料的焊接特点

1.2.1.1 连续纤维增强金属基复合材料的分类

连续纤维增强金属基复合材料一般根据所用的纤维及基体金属进行分类。例如，SiC 纤维增强铝基（记做 SiC_f/Al）、SiC 纤维增强钛基（SiC_f/Ti）、硼纤维增强铝基（B_f/Al）等。

所用的纤维大多数是直径几到几十微米的非晶体材料，例如，硼纤维、石墨纤维、SiC 纤维、Al₂O₃ 纤维、B₄C 纤维等；也有少量的金属纤维，例如，钨纤维、不锈钢丝等。这些纤维具有很高的强度、弹性模量和较低的密度，用于增强金属时，可以使其强度显著提高，而密度变化不大。表 1-5 给出了常用的增强纤维及其性能。

表 1-5 常用的增强纤维及其性能

纤维种类	直径/μm	制造方法	抗拉强度/ 10 ³ MPa	密度/ (g/cm ³)	拉伸弹性模量/ 10 ⁵ MPa
硼纤维	100 ~ 150	化学气相沉积	3.2	2.6	4.0
复硼 SiC 纤维	100 ~ 150	化学气相沉积	3.1	2.7	4.0
复硼碳纤维	100	化学气相沉积	3.28	2.2	3.6
SiC/C 纤维	140	化学气相沉积	2.7	3.0	4.0
β-SiC	10 ~ 15	烧结	2.4 ~ 2.9	2.55	1.7
碳纤维	70	热解	2.0	1.9	1.5
B ₄ C 纤维	70 ~ 100	化学气相沉积	2.4	2.7	4.0
高强度石墨纤维	7	热解	2.7	1.75	2.5
高弹性模量石墨纤维	7	热解	2.0	1.95	4.0
Al ₂ O ₃ 纤维	250	熔体拉制	2.4	4.0	2.5
S-玻璃纤维	7	熔体喷丝	4.1	2.5	8.0
铍纤维	100 ~ 250	拉拔丝	1.3	1.8	2.5
钨纤维	150 ~ 250	拉拔丝	2.7	19.2	4.0
不锈钢纤维	50 ~ 100	拉拔丝	4.1	7.9	1.8

1.2.1.2 连续纤维增强金属基复合材料的性能

1. 硼纤维增强铝基复合材料的性能

硼纤维是在钨丝或碳芯表面化学气相沉积一层硼元素而制成的一种高性能的增强纤维，具有很高的比强度和比模量，是最早采用的高性能纤维。由于其性能好，且单丝较粗（直径是 100 ~ 140μm），因此易于制造，性能稳定。表 1-6 给出了硼纤维增强铝基复合材料的性能。

表 1-6 硼纤维增强铝基复合材料的性能

基 体	纤维体积分数 (%)	纵向		横向		纵向断裂应变 (%)
		抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	
2024Al ^①	45	1287.5	202.1	—	—	0.775
	47	1420.7	222.1	—	—	0.795
	52	1721.0	—	—	—	—
	54	1798.6	—	—	—	—
	64	1527.6	275.9	—	—	0.72
	66	1739.2	—	—	—	—
	70	1927.6	—	—	—	—

(续)

基 体	纤维体积分数 (%)	纵向		横向		纵向断裂应变 (%)
		抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	
2024Al-T6 ^①	46	1458.7	220.7	—	—	0.81
	64	1924.1	275.9	—	—	0.755
6061Al ^②	48	1489.7	—	—	—	—
	50	1343.4	217.2	—	—	0.695
6061Al-T6 ^①	51	1417.2	231.7	—	—	0.735
1100Al ^②	20	519 ~ 540	136.7	98 ~ 117	77.9	—
纯 Al	25	737 ~ 837	146.9	98 ~ 117	88.75	—
	30	850 ~ 890	163.4	98 ~ 117	94.80	—
	35	960 ~ 1020	191.5	88 ~ 117	118.80	—
	40	1070 ~ 1130	199.3	88 ~ 108	127.60	—
	47	1213 ~ 1230	226.6	88 ~ 108	134.50	—
	54	1200 ~ 1270	245.0	69 ~ 79	139.10	—

① 纤维直径为 140μm。

② 纤维直径为 950μm。

2. 碳（石墨）纤维增强金属基复合材料

碳（石墨）纤维密度小，具有非常优异的力学性能，是现有连续纤维增强金属基复合材料中性价比最高的一种。它可与很多金属复合成高性能的碳纤维增强金属基复合材料，其中用得最多的是碳（石墨）纤维增强铝基复合材料。表 1-7 给出了几种碳（石墨）纤维增强金属基复合材料的性能。

表 1-7 几种碳（石墨）纤维增强金属基复合材料的性能

基体	基体成分	纤 维		制造工艺	抗拉强度/ MPa	拉伸弹性模量/ 10 ⁵ MPa
		牌号	体积分数(%)			
铝基	纯铝	T-75	32	渗透、挤压	680	1.78
			35		650	1.47
	铝 + 7% 锌		32	渗透、挤压	710	1.66
			38		870	1.90
	铝 + 7% 镁		31	渗透	680	1.95
	铝 + 7% 硅		32	渗透	550	1.65
铜基	镍 + 铜	—	30 ~ 50	纤维镀镍后再镀铜, 600℃ 热压	560 (400℃ 时测量)	—
镁基	—	T-75	42	渗透、挤压	450	1.80
镍基	—	T-50	50	纤维镀镍后热压: 温度为 700℃、1250℃, 时间为 5min ~ 2h, 压力为 10 ~ 35MPa	800	240
		T-75	50		830	310
铅基	—	T-75	41	纤维电沉积后渗透、挤压	717.2	200
锌基	—	T-75	35	渗透、挤压	758.6	116.5
铍基	—	Hough	45	叠片、压合	1103.4	—

3. 碳化硅纤维增强金属基复合材料

与碳（石墨）纤维及硼纤维相比，碳化硅纤维在较高温度下与铝仍具有较好的相容性。因此，这种纤维被广泛用作铝及其合金的增强相。碳化硅纤维分为有芯和无芯两种：有芯碳化硅纤维以钨丝或碳丝做底丝；无芯碳化硅纤维由聚碳硅烷有机物转换而得。表 1-8 给出了几种碳化硅纤维增强金属基复合材料的性能。

表 1-8 几种碳化硅纤维增强金属基复合材料的性能

纤维取向	叠层数	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂应变(%)	泊松比	线膨胀系数/(10 ⁻⁶ /K)
0°	6,8,12	1462	204.1	0.89	0.268	6.6
90°	6,12,40	86.2	118.0	0.08	0.124	21.3
[0°,90°,0°,90°]	8	673	136.5	0.90	—	—
[0°,90°,0°]	8	1144	180.0	0.92	—	—
[90°,0°,90°]	8	341.3	96.5	1.01	—	—
±45°	8,12,40	309.5	94.5	10.6	0.395	—
[0°,±45°,0°]	8,16	800.0	146.2	0.86	—	—
[0°,±45°,90°]	8	572.3	127.0	1.0	—	—

4. Al₂O₃ 纤维增强铝基复合材料

Al₂O₃ 纤维增强铝基复合材料具有高的刚度和强度，而且在氧化性气氛中稳定，能在高温下保持其高硬度、强度和耐磨性。表 1-9 给出了 Al₂O₃ 纤维增强铝基复合材料的性能。

表 1-9 Al₂O₃ 纤维增强铝基复合材料的性能

增强纤维			α -Al ₂ O ₃			γ -Al ₂ O ₃	
基体金属			Al	Mg	Pb	Al	Al + 5% Cu
密度/(g/cm ³)			3.25	2.8	6.7	2.9	2.9
抗拉强度/MPa	(0°)	293K	585	482	517	860	590
	(45°)		—	—	—	—	440
	(90°)		172	110	41	98	230
	(0°)	723K	—	—	—	860	670
	(90°)		—	—	—	31	86
抗拉弹性模量/GPa	(0°)	293K	220	207	193	150	150
	(90°)		138	104	69	110	110
	(0°)	723K	—	—	—	140	140
抗拉疲劳强度(10 ⁷ 次)/MPa	(0°)	298K	430	310	—	400	250
	(90°)		—	—	—	—	80
抗弯强度/MPa	(0°)	293K	1030	1030	896	1100	1000
	(45°)		—	—	—	400	800
	(90°)		—	—	—	180	480
	(0°)	723K	790	970	—	800	950
抗弯弹性模量/GPa	(0°)	293K	262	220	—	135	135
	(0°)	723K	220	200	—	—	100
弯曲疲劳强度(10 ⁷ 次)/MPa	(0°)	298K	—	—	—	300	—

(续)

增强纤维			$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$			$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	
基体金属			Al	Mg	Pb	Al	Al + 5% Cu
抗压强度/MPa	(0°)	293K	>2760	>1940	—	1430	2200
	(45°)		—	—	—	—	580
	(90°)		344	241	—	—	540
	(0°)	723K	—	780	—	—	580
压缩弹性模量/GPa	(0°)	293K	—	207	—	140	140
泊松比		293K	0.244	0.243			0.33
弹性模量/MPa		293K	48	41			35
夏比冲击值/(J/cm ²)	(0°)	293K	—	—	—	9.4	2.2
	(45°)		—	—	—		3.0
	(90°)		—	—	—		2.0
	(0°)	723K	—	—	—		3.0
蠕变极限应力/MPa	(0°)	623 ~ 723K	—	—	—	—	260
比热容/[kJ/(kg · K)]			0.84	—	—	0.88	—
线膨胀系数/(10 ⁻⁶ /K)	(0°)		7.2	6.8	—	7.5	—
	(90°)		20	—	—	14.0	—
热导率/[W/(m · K)]	(0°)	300 ~ 673K	—	—	—	105	—
	(90°)		—	—	—	75.3	41.9

5. 钢丝纤维增强铝基复合材料

由于钢的密度高，因此钢丝纤维增强铝基复合材料的比强度和比刚度不如高性能纤维增强铝基复合材料。但是这种复合材料具有成本低、工艺性能好等优点，因此是一种实用的结构材料。基体材料可用工业纯铝 1100（L4），非热处理铝合金 5052、5054、5056（LD2、LD3、LD6）和热处理强化铝合金 6061、2024、2219、7075（LD2、LD12、LD16、LD4）及其他 LD4 铝合金。增强相常用耐蚀钢丝，主要为冷变形时有亚稳奥氏体，并在冷拉时发生马氏体相变的钢丝。表 1-10 给出了不锈钢增强铝基复合材料的性能。

表 1-10 不锈钢增强铝基复合材料的性能

钢丝	钢丝体积分数(%)	试验温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)
12C18N10T	5	300	163	98	19.2
	10		236	171	6.2
	15		248	183	6.0
	20		251	183	2.5
BJI322	15		212	143	5.1
	5		126	75	20.1
12C18N10T	10	350	163	102	10.3
	15		184	107	9.9
BJI322	15	350	264	—	8.9

6. 碳化硅纤维增强钛基复合材料

与纤维增强铝基复合材料相比，纤维增强钛基复合材料可用于更高的工作温度下。表1-11 给出了碳化硅纤维增强钛基复合材料的性能。

表 1-11 碳化硅纤维增强钛基复合材料的性能

复合材料	纤维体积分数(%)	试验温度/℃	纤维排列方向	抗拉强度/MPa	比例极限/MPa	拉伸弹性模量/10 ⁵ MPa	伸长率(%)
SiC 纤维增强 Ti-6Al-4V (SiC _f /Ti-6Al-4V)	28	室温	0	979.2	806.1	2.5	—
			15	930.1	806.1	2.4	—
			30	779.2	716.6	2.2	—
			45	737.9	516.8	2.1	—
			90	655.1	365.2	1.9	—
SiC 纤维增强 Ti-6Al-4V (SiC _f /Ti-6Al-4V)	35	室温	0	1434	—	1.86	0.96
SiC 纤维增强 Ti-15V-3Sn-3Cr-3Al (SiC _f /Ti-6Al-4V)	38	室温	0	1572	—	1.97	0.86

1.2.1.3 连续纤维增强金属基复合材料的焊接性

连续纤维增强金属基复合材料是由基体金属及增强纤维组成，这类材料的焊接不仅涉及基体金属之间的焊接，还涉及基体金属与纤维增强相之间以及纤维增强相之间的焊接。金属基体通常是一些塑性和韧性较好的金属，其焊接性一般都较好；而纤维增强相一般为高强度、高弹性模量、高熔点、低密度和低线胀系数的非金属，其焊接性一般都很差。因此，连续纤维增强金属基复合材料的焊接性也都很差。除其焊接性很差之外，焊接时还会遇到下列一些问题。

1. 界面反应

由于焊接产生高温，在连续纤维增强金属基复合材料的金属基体与连续纤维增强相的接触界面上容易发生化学反应，生成对材料性能不利的脆性相。

(1) C_f/Al 复合材料 (f 表示连续纤维增强) 碳在固态和液态铝中的溶解度都很小。在 800℃、1000℃、1100℃ 与 1200℃ 的溶解度分别为 0.10%、0.14%、0.16% 与 0.32% (质量分数)。C 与 Al 在从室温到 1670℃ 的温度范围内都能发生化学反应，生成 Al₄C₃。但是两者明显发生化学反应的温度约为 400 ~ 500℃。因此，在焊接温度范围内都能发生化学反应，生成 Al₄C₃。

Al₄C₃ 为脆性针状组织，可使基体与增强纤维之间的界面强度大大下降。另外，Al₄C₃ 能与水反应，生成 Al₂O₃ 放出 CH₄，易使焊接接头发生低应力破坏。

(2) B_f/Al 复合材料 硼在铝中的溶解度很小，最大固溶度为 0.025% (质量分数)，730℃ 与 1300℃ 时硼在液态铝中的溶解度分别为 0.09% 与 2.0%。在熔化焊接过程中，硼与铝发生化学反应，生成 AlB₂ 或 AlB₁₀，使基体与增强纤维之间的界面强度下降。如果与基体

1100Al 反应, 生成 AlB_{10} ; 与基体 6060Al 反应, 则生成 AlB_{10} 。

(3) SiC_f/Al 复合材料 SiC_f/Al 复合材料中的 SiC 与 Al 在固态下不会发生化学反应, 但当基体铝熔化后可发生化学反应, 生成 Al_4C_3 。



(4) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料在 1000°C 以下时, Al 对 Al_2O_3 的润湿性很差, 虽然 Al 对 Al_2O_3 不会发生化学反应, 但铝合金中的 Mg 却极易与 Al_2O_3 发生化学反应。向铝基体中添加 Li ($<3\%$), 既可抑制这种反应, 又可改善 Al 对 Al_2O_3 的润湿性。

(5) 钢丝增强铝基复合材料 铁在铝中的溶解度也很小, 460°C 以下铁在铝中不固溶, 500°C 、 600°C 、 655°C 时铁在铝中的溶解度分别为 0.006% 、 0.025% 、 0.052% (质量分数)。

在熔化状态下, 铁与铝可生成多种金属间化合物, 其中, 大多数在室温下是稳定的。因此, 在用熔化焊焊接钢丝增强铝基复合材料时, 这些金属间化合物都有可能生成。钢丝中加入 C、Cr、Cu、Ni、Mo、Si 等可抑制铁与铝的反应, 其中, Si 最有效。

(6) SiC_f/Ti 复合材料 在熔化状态下, SiC 与 Ti 可以发生化学反应, 生成 TiC、 Ti_5Si_3 、 TiSi_2 及更复杂的化合物, 这些化合物对焊接接头的性能是不利的。

由于在连续纤维增强金属基复合材料的焊接中发生界面反应对焊接接头的性能不利, 因此防止或减轻界面反应对焊接接头的性能改善就很重要。该问题如同金属的焊接一样, 可以从冶金及工艺两个方面来克服。

在冶金方面, 可以加入亲和力比基体金属更大或能够阻止界面反应, 而又不损害基体金属性能的元素来防止或减轻界面反应。例如, 在焊接 SiC_f/Al 复合材料时, 可以加入 Ti, Ti 能够取代 Al 而与 SiC 发生反应。这样, 不仅避免了有害化合物 Al_4C_3 的产生, 而且形成的 TiC 还能起到强化的作用。此外, 提高基体金属 Al 中的 Si 含量或利用 Si 含量高的焊接材料, 还可以抵制 Al 与 SiC 发生反应。

在工艺方面, 通过控制使用 Si 含量高的焊接材料, 还可以抵制 Al 与 SiC 发生反应, 通过控制加热温度和加热时间来避免或限制反应的进行。例如, 采用固相焊接或低热输入的熔化焊焊接工艺来限制 SiC_f/Al 复合材料的界面反应。

2. 熔池的流动性差

由于基体金属与纤维的熔点相差较大, 采用熔化焊时基体金属熔池中存在大量的固体纤维, 因而流动性差, 易于形成气孔、未焊透和未熔合等缺陷, 并且加重了基体金属的裂纹敏感性。

3. 接头残余应力大

由于基体金属与纤维的线胀系数相差较大, 在焊接的加热和冷却过程中, 会发生很大的内应力, 甚至于使基体金属与纤维的接合面脱开。

4. 纤维的分布状态被破坏

压力焊时, 如果压力过大, 增强纤维将发生断裂; 如果压力过小, 接头接合不良。电弧焊时, 在电弧力的作用下, 纤维会发生偏聚或断裂。

5. 接头纤维不连续

由于焊接接头纤维不可能是连续的, 因此焊接接头的强度及刚度比母材低。